

Αξιολόγηση υψομετρικού μοντέλου επιφάνειας που παράχθηκε από στερεοεικόνες Cartosat-1 για την περιοχή του Χολομώντα Χαλκιδικής

Π. Στουρνάρα, Π. Πατιάς

*Τομέας Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας,
Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.*

Περίληψη: Οι στερεοεικόνες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υψομετρικών μοντέλων επιφάνειας ή αλλιώς DSM (Digital Surface Model). Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η αξιολόγηση της ακρίβειας των DSM που παράγονται από στερεοεικόνες Cartosat-1 με τη χρήση εμπορικών λογισμικών, στο γεωγραφικό πλαίσιο της Ελλάδας. Περιοχή μελέτης ήταν η ευρύτερη περιοχή του όρους Χολομώντα στη Χαλκιδική. Για τον αεροτριγωνισμό του στερεοζεύγους χρησιμοποιήθηκαν φωτοσταθερά ακρίβειας μερικών εκατοστών μετρημένα με GPS με καλή κατανομή στην εικόνα. Η ακρίβεια του αεροτριγωνισμού ήταν οριζοντιογραφικά και κατά τον άξονα Z (μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE) 0,5m. Η ακρίβεια του DSM ήταν 1,4m (RMSE). Τα στερεοζεύγη εικόνων Cartosat-1 έχουν τη δυνατότητα παραγωγής DSM με ακρίβεια μικρότερης της μίας ψηφίδας (RMSE).

1. Εισαγωγή

Ο δορυφόρος Cartosat-1 που εκτοξεύτηκε τον Μάιο του 2005 από τον Ινδικό Οργανισμό Διαστημικών Ερευνών ISRO (Indian Space Research Organization) φέρει δύο παγχρωματικούς αισθητήρες με τους οποίους γίνεται η λήψη στερεοεικόνων χωρικής ανάλυσης 2,5 m. Η ραδιομετρική ανάλυση του Cartosat-1 είναι 10bit και δίνει τη δυνατότητα καλής διάκρισης των χαρακτηριστικών της εικόνας (URL1-2).

Οι στερεοεικόνες Cartosat-1 παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής υψομετρικών μοντέλων επιφάνειας ή αλλιώς DSM (Digital Surface Model). Η ακρίβεια των παραχθέντων DSM από προηγούμενες μελέτες ποικίλει. Σε επίπεδες (Warsaw, Πολωνία) και ορεινές περιοχές (Mausanne les Alpilles, Γαλλία) το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE-Root Mean Square Error) ήταν 2 m και 7 m αντίστοιχα (Titarov, 2008). Σε αστική και περιαστική περιοχή της Ρώμης με υψόμετρο από 20 έως 60m, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν 2,5-5m. Ο έλεγχος της ακρίβειας του DSM έγινε στο 6% της συνολικής εικόνας (Crespi et al., 2007). Η δυνατότητα του Cartosat-1 για την παραγωγή DSM αξιολογήθηκε, επίσης, σε περιοχές μελέτης στην Ισπανία (Καταλονία) και στην Ιαπωνία (Sakurajima), (Kocaman et al., 2008). Το ανάγλυφο της περιοχή μελέτης στην Ισπανία χαρακτηρίζεται κατά το ήμισυ λοφώδες με δάσος, δέντρα, θάμνους, ακάλυπτο έδαφος και κατά το υπόλοιπο επί-

πεδο, περιλαμβάνοντας τμήμα αστικής περιοχής της Βαρκελώνης, μερικά χωριά, δέντρα και περιοχές ακάλυπτου εδάφους. Η ακρίβεια (RMSE) του DSM ήταν περίπου 3m. Η περιοχή μελέτης στην Ιαπωνία χαρακτηρίζεται ως ηφαιστειογενής με απότομο ανάγλυφο. Τα αποτελέσματα της ακρίβειας για το DSM ήταν χειρότερα, περίπου 7m (RMSE). Τα μεγάλα σφάλματα σ' αυτήν την περίπτωση οφείλονταν σε παράγοντες όπως η απότομη επιφάνεια των ηφαιστειών, η σκίαση, η χαμηλή υφή των εικόνων και η μεγάλη διαφορά μεταξύ των γωνιών κλίσης των αισθητήρων A και F του Cartosat-1. Το συμπέρασμα ήταν ότι, σε γενικές γραμμές, ο Cartosat-1 έχει δυνατότητες για την παραγωγή DSM με βήμα καννάβου περίπου 10 m και ακρίβεια (RMSE) περίπου 3m. Η δυνατότητα του δορυφόρου Cartosat-1 στην παραγωγή DSM αξιολογήθηκε σε περιοχή με μεταβλητό ανάγλυφο (επίπεδο και λοφώδες) και διαφορετικά είδη κάλυψης γης όπως δέντρα, θάμνους και αγροτικές καλλιέργειες (Mausanne les Alpilles, Γαλλία). Το συμπέρασμα ήταν το ίδιο (Baltsavias et al., 2007).

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της καταλληλότητας των στερεοεικόνων Cartosat-1 στην παραγωγή DSM σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές του ελλαδικού χώρου. Γι' αυτό έγινε ένα τεστ παραγωγής DSM από στερεοζεύγος Cartosat-1 καθώς και αξιολόγησής του για την περιοχή του Χολομώντα Χαλκιδικής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης (2^ο Κεφάλαιο), τα δεδομένα εικόνων και φωτοσταθερών (3^ο Κεφάλαιο), γίνεται ανάλυση της παραγωγής του DSM και αξιολόγηση της ακρίβειάς του (4^ο Κεφάλαιο). Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα (5^ο Κεφάλαιο).

2. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι η δασική έκταση του όρους Χολομώντα στο νομό Χαλκιδικής. Χαρακτηρίζεται από πυκνή δασική βλάστηση. Τα κυριότερα είδη δέντρων που συναντώνται στην περιοχή αυτή είναι πεύκα, έλατα, δρυς, οξιές, καστανιές. Επίσης υπάρχει θαμνώδης βλάστηση, (URL3). Το ανάγλυφο είναι μεταβλητό και η μέγιστη υψομετρική διαφορά της περιοχής μελέτης φτάνει τα 1150 m.

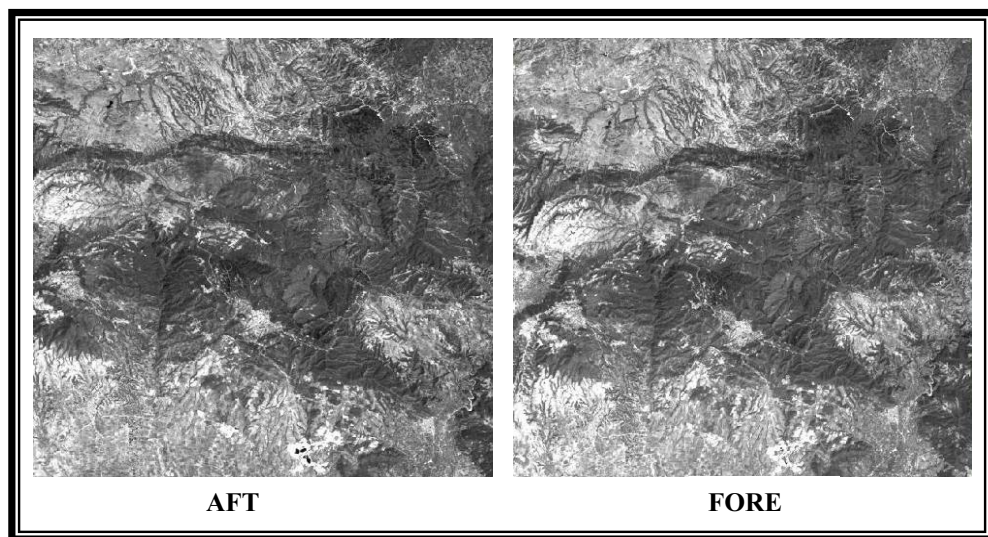


Εικόνα 1. Περιοχή μελέτης, περιλαμβάνεται στο κόκκινο πλαίσιο (URL4).

3. Δεδομένα

3.1 Δορυφορικά δεδομένα

Τα δορυφορικά δεδομένα είναι ένα στερεοζεύγος Cartosat-1 με ημερομηνία λήψης 18 Αυγούστου 2006. Οι εικόνες είναι παγχρωματικές με χωρική ανάλυση 2,5 μέτρα. Οι εικόνες ανάλογα με την κλίση του δορυφόρου τη στιγμή της λήψης διακρίνονται στην εικόνα AFT (κλίση -5 μοίρες) και στην εικόνα FORE (κλίση +26 μοίρες). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι παράμετροι των αισθητήρων του Ινδικού δορυφόρου IRS-P5 Cartosat-1 (URL2). Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το στερεοζεύγος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη και στον Πίνακα 2 τα αναλυτικά στοιχεία των δύο εικόνων του στερεοζεύγους.



Εικόνα 2. Το στερεοζεύγος Cartosat-1 για το όρος Χολομώντα.

Τα αρχεία των “Rational Functions” (RPC-Rational Polynomial Coefficients), που διατείνονται μαζί με τις δορυφορικές εικόνες. Για μετασχηματισμούς ανάμεσα στο επίγειο σύστημα αναφοράς και το σύστημα αναφοράς της εικόνας χρειάζονται φυσικές παράμετροι της φωτογραμμετρικής μηχανής λήψης όπως η εστιακή απόσταση, η θέση του πρωτεύοντος σημείου, παράμετροι προσανατολισμού της εικόνας κλπ. Στις δορυφορικές εικόνες Cartosat-1 η λήψη κάθε γραμμής σάρωσης γίνεται σε διαφορετική χρονική στιγμή. Ο εξωτερικός προσανατολισμός (γωνίες ω , ϕ , κ) και η θέση του πρωτεύοντος σημείου (X_0 , Y_0 , Z_0) είναι διαφορετικά για κάθε γραμμή σάρωσης. Το μοντέλο των “Rational Functions” είναι μια γενική μορφή πολυωνυμικού μοντέλου που μπορεί να περιγράψει πιο περίπλοκους μετασχηματισμούς ανάμεσα στο επίγειο σύστημα αναφοράς και το σύστημα αναφοράς της εικόνας, όπως στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων Cartosat-1. Το μοντέλο

Πίνακας 1. Παράμετροι των αισθητήρων του Ινδικού δορυφόρου IRS-P5 Cartosat-1

Παράμετροι	Εικόνα FORE	Εικόνα AFT
Κλίση αισθητήρα	+26°	-5°
Χωρική ανάλυση	2.5 m	
Ραδιομετρική ανάλυση	10 bit	
Φασματική περιοχή	500-850 nm	
Εστιακή απόσταση	1.945 mm	

Πίνακας 2. Αναλυτικά στοιχεία για τις εικόνες AFT και FORE του στερεοζεύγους.

Είδος στοιχείου	Εικόνα FORE	Εικόνα AFT
Ταυτότητα Δορυφόρου	CARTOSAT-1	
Αισθητήρας	PAN_FORE	PAN_AFT
Ημερομηνία λήψης	18 August 2006	
Κωδικός Path	229	
Κωδικός Row	213	
Ανάλυση κατά μήκος	2.5 m	
Ανάλυση κατά πλάτος	2.5 m	
Αριθμός σαρώσεων	12.000	
Αριθμός των pixel	12.000	

των “Rational Functions” μετασχηματίζει τις συντεταγμένες των σημείων της εικόνας ως λόγους κυβικών πολυωνύμων σε συντεταγμένες στο επίγειο σύστημα αναφοράς (Singh et al., 2008).

3.2 Φωτοσταθερά

64 φωτοσταθερά μετρημένα με GPS ακρίβειας από 0,6cm-6,7cm. Τα φωτοσταθερά βρίσκονται ανά δύο σε πολύ κοντινές θέσεις. Οι αποστάσεις τους ξεκινούν από 60m περίπου και φτάνουν τα 1.090m περίπου. Λήφθηκαν κατά τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο του 2006.

4. Παραγωγή DSM

Αρχικά έγινε ο αεροτριγωνισμός με τη χρήση των φωτοσταθερών σημείων, που

μετρήθηκαν με GPS. Με την επίλυση της δέσμης προσδιορίστηκε ο εξωτερικός προσανατολισμός του μοντέλου και έγινε πύκνωση των γνωστών σημείων. Κατά το δεύτερο στάδιο, έγινε η παραγωγή του DSM. Με γνωστό εξωτερικό προσανατολισμό υπολογίστηκαν εμπροσθοτομικά οι συντεταγμένες των σημείων της εικόνας στο έδαφος. Τα σημεία αυτά ονομάζονται “mass points”. Η τελική μορφή του DSM μπορεί να είναι σε μορφή εικόνας, 3D Shape, Terramodel Tin, ASCII, Leica Terrain Format. Στην παρούσα εφαρμογή επιλέχθηκε η μορφή εικόνας για το παραγόμενο DSM. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LPS (Leica Photogrammetry Suite) 9.2.

4.1 Αεροτριγωνισμός

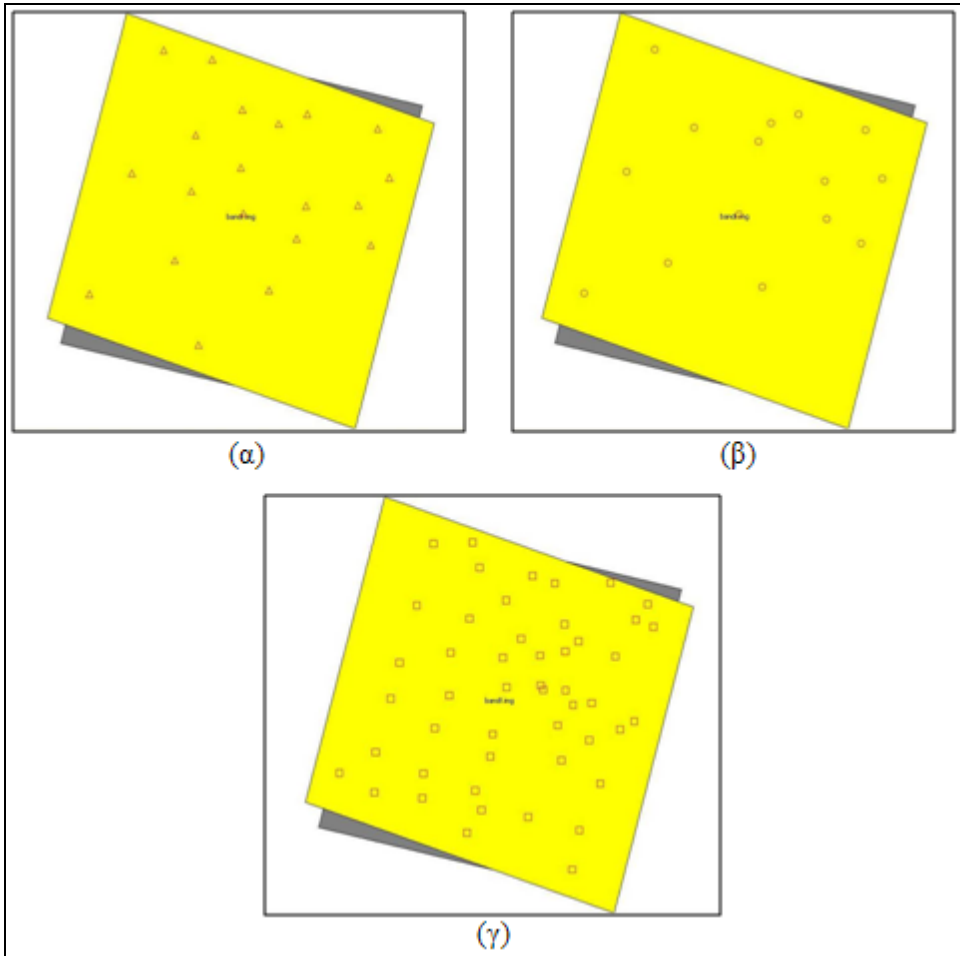
Με σκοπό την εφαρμογή της δέσμης χρησιμοποιήθηκαν αρχικά όλα τα φωτοσταθερά, 64 σημεία. Η πρώτη σειρά αριθμήθηκε από 1 έως 32 και η δεύτερη από 41 έως 72. Απορρίφθηκαν τα φωτοσταθερά με τα μεγαλύτερα σφάλματα. Τελικά χρησιμοποιήθηκαν 35 φωτοσταθερά, εκ των οποίων τα 20 ως φωτοσταθερά για την επίλυση της δέσμης (control points) και 15 ως σημεία ελέγχου (check points). Χρησιμοποιήθηκαν 50 σημεία σύνδεσης (tie points). Η κατανομή των σημείων έγινε σε όλη την έκταση της εικόνας και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.

Χρησιμοποιήθηκε το αρχείο των “Rational Functions” με πολυωνυμική βελτίωση 1^{ου} βαθμού. Με τη χρήση της πολυωνυμικής βελτίωσης γίνονται διορθώσεις στο αρχικό αρχείο των “Rational Functions” και βελτιώνεται η μαθηματική λύση του μοντέλου. Η βελτίωση 1^{ου} βαθμού αντιστοιχεί στον αφινικό μετασχηματισμό.

Ως τυπική απόκλιση των συντεταγμένων της εικόνας επιλέχθηκε 1/3 του pixel. Ως τυπική απόκλιση των φωτοσταθερών επιλέχθηκε 0,5m για όλα τα φωτοσταθερά. Η ακρίβεια των φωτοσταθερών που μετρήθηκαν με GPS ήταν καλύτερη. Όμως, δεν έχει νόημα να επιλεχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, γιατί δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός των φωτοσταθερών στην οθόνη του H/Y από τον χρήστη με ακρίβεια καλύτερη από 1/5 pixel. Στην εικόνα Cartosat-1 το μέγεθος του pixel στο έδαφος είναι 2,5m. Επομένως η επιλογή τυπικής απόκλισης 0,5m ήταν επαρκής.

Η ακρίβεια του αεροτριγωνισμού αξιολογήθηκε βάσει των σημείων ελέγχου (Πίνακας 3). Παρατηρείται ότι είναι πολύ καλή, 0,5m οριζοντιογραφικά και 0,5m κατά τον άξονα Z. Τα σφάλματα (Residuals) των σημείων ελέγχου εκφράζουν τη διαφορά ανάμεσα στις αρχικές συντεταγμένες των σημείων και τις νέες συντεταγμένες. Το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Root Mean Square Error) κατά X, Y και Z υπολογίζεται βάσει των τύπων (4.1)-(4.3). Το συνολικό μέσο τετραγωνικό οριζοντιογραφικό σφάλμα και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στο χώρο για τα σημεία ελέγχου υπολογίζεται βάσει των τύπων (4.4)-(4.5).

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{X_i}^2} \quad (4.1)$$



Εικόνα 3. Η κατανομή (α) των φωτοσταθερών για την επίλυση της δέσμης (control points), (β) των σημείων ελέγχου (check points) και των σημείων σύνδεσης (tie points).

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Y_i}^2} \quad (4.2)$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Z_i}^2} \quad (4.3)$$

$$RMSE_{OP} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{X_i}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Y_i}^2} \quad (4.4)$$

$$RMSE_{OL} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{X_i}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Y_i}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Z_i}^2} \quad (4.5)$$

όπου

V_{Xi} , V_{Yi} , V_{Zi} : Σφάλμα κατά X, Y και Z αντίστοιχα για το σημείο ελέγχου i
 n : το σύνολο των σημείων ελέγχου

$RMSE_X$, $RMSE_Y$, $RMSE_Z$: Συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα κατά X, Y και Z

$RMSE_{OP}$: Συνολικό μέσο τετραγωνικό οριζοντιογραφικό σφάλμα

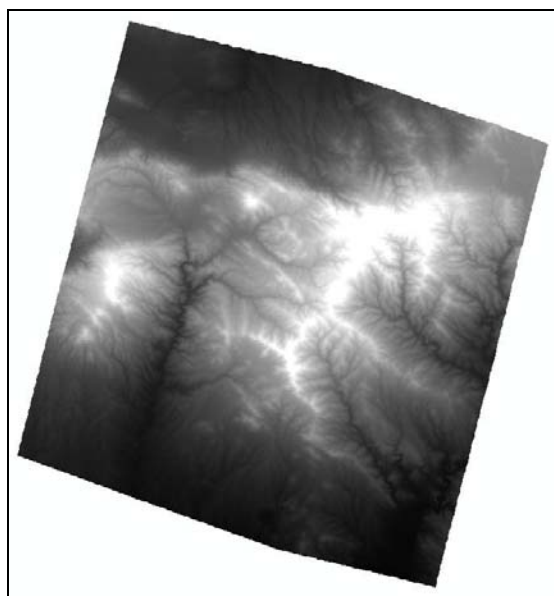
$RMSE_{OL}$: Συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα στο χώρο

Πίνακας 3. Η ακρίβεια του αεροτριγωνισμού.

Συνολικά σφάλματα RMSE αεροτριγωνισμού (m)	
$RMSE_X$	0,3
$RMSE_Y$	0,4
$RMSE_Z$	0,5
$RMSE_{OP}$	0,5
$RMSE_{OL}$	0,7

4.2 Παραγωγή και Αξιολόγηση DSM

Ο εξωτερικός προσανατολισμός του μοντέλου προσδιορίστηκε με την επίλυση της δέσμης. Με γνωστό τον εξωτερικό προσανατολισμό ακολούθησε η παραγωγή του DSM (Εικόνα 4), κατά την οποία υπολογίζονται εμπροσθοτομικά οι συντεταγμένες



Εικόνα 4. Το DSM που παράχθηκε από το στερεοζεύγος των εικόνων Cartosat-1.

των σημείων της εικόνας στο έδαφος. Το DSM που παράχθηκε καλύπτει περιοχή 770 km² περίπου με βήμα καννάβου 10m. Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης είναι μεταβλητό με μέγιστη διαφορά υψομέτρου 1.150 m περίπου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή του DSM.

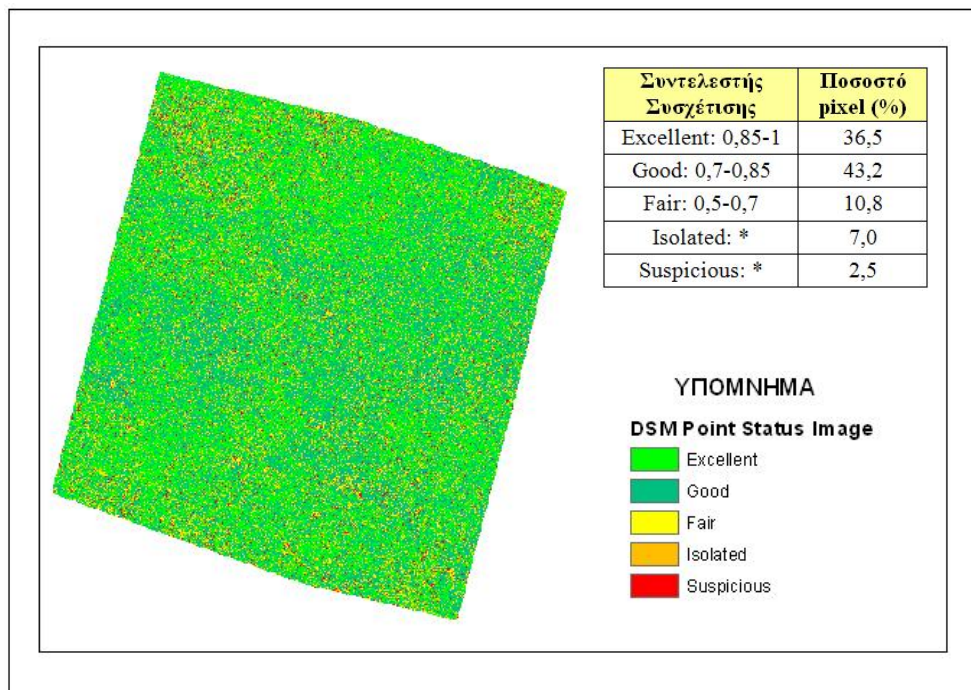
Παράμετροι για την παραγωγή του DSM	Τιμή
Μέγεθος παραθύρου Αναζήτησης	17x3 pixel
Μέγεθος παραθύρου Συσχέτισης	3x3 pixel
Συντελεστής Συσχέτισης	0.75
Είδος Αναγλύφου	Ορεινό
Είδος Αντικειμένων	Δάσος
Φίλτράρισμα DSM	Χαμηλό

Όπου :

- Το Μέγεθος παραθύρου Αναζήτησης (Search size) είναι το μέγεθος του παραθύρου (σε pixel) που χρησιμοποιείται για την εύρεση ομόλογων σημείων στις εικόνες του στερεοζεύγους, γύρω από μια αρχική προσέγγιση για τη δεύτερη εικόνα. Το μέγεθος του μετράται κατά τις διευθύνσεις X και Y. Η διεύθυνση των X είναι κατά μήκος της επιπολικής γραμμής και η διεύθυνση των Y είναι κάθετη στην επιπολική γραμμή.
- Το Μέγεθος παραθύρου Συσχέτισης (Correlation size) είναι το μέγεθος του προτύπου (σε pixel) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης.
- Ο Συντελεστής Συσχέτισης (Correlation coefficient) είναι η ελάχιστη τιμή συντελεστή συσχέτισης για να ληφθεί μια αντιστοίχιση ως σωστή (LGGI, 2008).

Η ποιότητα του DSM αξιολογήθηκε με τη χρήση της θεματικής εικόνας “DSM Point Status image” (Εικόνα 5), των φωτοσταθερών και των σημείων ελέγχου. Η θεματική εικόνα για την ποιότητα των σημείων του DSM παράγεται ταυτόχρονα με το DSM. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η ποιότητα των σημείων του DSM. Σημεία που χαρακτηρίστηκαν ως “excellent” αποδίδονται με πράσινο χρώμα, ως “good” με σκούρο πράσινο, ως “fair” με κίτρινο, ως “isolated” με πορτοκαλί, ως “suspicious” με κόκκινο. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των σημείων της εικόνας (90,5%) ανήκει στις κατηγορίες “excellent”, “good” και “fair”, γεγονός που δείχνει ότι το DSM είναι πολύ καλής ποιότητας. Ο συνολικός αριθμός σημείων του DSM είναι 8.207.572.

Η αξιολόγηση της υψομετρικής ακρίβειας του DSM έγινε με σύγκριση του με τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στον αεροτριγωνισμό (Πίνακας 5). Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 35 σημεία για την αξιολόγηση της ακρίβειάς του. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, που υπολογίζεται βάσει της σχέσης (4.3), ήταν 1,4 m. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από τα καλά αποτελέσματα στον αεροτριγωνισμό. Το RMSE_Z του αεροτριγωνισμού ήταν 0,5 m.



Εικόνα 5. Η ποιότητα των σημείων του παραχθέντος DSM¹.

Πίνακας 5. Ακρίβεια του DSM.

Σφάλματα του παραχθέντος DSM	m	pixels
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE	1,4	0,6
Μέγιστο Απόλυτο Σφάλμα	2,7	1,1

Ο λόγος b/h για το στερεομοντέλο του Cartosat-1 έχει ονομαστική τιμή 0,62 (Krishnaswamy, 2002). Η αναμενόμενη ακρίβεια του DSM βάσει της σχέσης (4.6) (Πατιάς, 2001)

$$\sigma_z = 2 \frac{c}{b} \sigma_o = 2 \frac{h}{b} \sigma_o \quad (4.6)$$

όπου c είναι η εστιακή απόσταση του αισθητήρα, h η απόσταση από τον αισθητή-

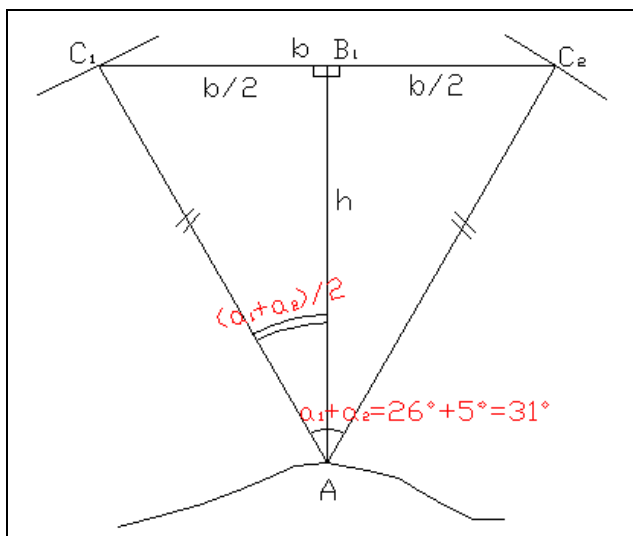
¹ Σημεία που δεν έχουν άλλα άμεσα γειτονικά σημεία χαρακτηρίζονται ως “isolated”. Για τον χαρακτηρισμό “suspicious” ακολουθείται η εξής διαδικασία (LGGI, 2008): Το λογισμικό υπολογίζει την τιμή του υψομέτρου ενός σημείου από τα γειτονικά σημεία με τη χρήση ενός παραθύρου 3x3 pixel. Η τιμή του υψομέτρου στο παραχθέν DSM αφαιρείται από την τιμή του υψομέτρου που προκύπτει από την παρεμβολή με τη χρήση του παραθύρου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τυπική απόκλιση των γειτονικών σημείων του στο DSM. Αν η διαφορά είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την τυπική απόκλιση, το σημείο χαρακτηρίζεται ως “suspicious”.

ρα, b η βάση του στερεοζεύγους, σ_0 η ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων, είναι $\sigma_z = 2 \frac{h}{b} \sigma_0 = 2 \frac{1}{0.62} \frac{1}{5} \text{pixel} = 2 \frac{1}{0.62} \frac{1}{5} \cdot 2,5 = 1.61 \text{m}$. Η ακρίβεια μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων λήφθηκε ίση με το $1/5$ του pixel, γιατί η *aposteriori* οριζοντιογραφική ακρίβεια του αεροτριγωνισμού ήταν $0,5 \text{m}$.

Η αναμενόμενη ακρίβεια του παραχθέντος DSM μπορεί να προσδιοριστεί αν μελετηθεί η γεωμετρία της λήψης των εικόνων του στερεοζεύγους (Σχήμα 1). Από το Σχήμα 1 προκύπτει $\tan \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} = \frac{b/2}{h} = \frac{b}{2h}$ για τα ορθογώνια τρίγωνα AB_1C_1 ,

AB_1C_2 . Άρα $\frac{b}{h} = 2 \tan \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} = 2 \tan \frac{(31^\circ)}{2} = 0,55$. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τη σχέση (4.6) η αναμενόμενη ακρίβεια του DSM προσδιορίζεται ότι είναι $\sigma_z = 2 \frac{h}{b} \sigma_0 = 2 \frac{1}{0,55} \cdot 0,5 = 1,82 \text{m}$. Η παραλλακτική γωνία από τα μεταδεδομένα των

δορυφορικών εικόνων είναι $30,5^\circ$ και δε διαφέρει σημαντικά από την ονομαστική τιμή της. Αν χρησιμοποιηθεί γωνία $30,5^\circ$ τα αποτελέσματα για την αναμενόμενη ακρίβεια του DSM είναι παρόμοια.



Σχήμα 1. Η γεωμετρία λήψης των στερεοεικόνων Cartosat-1. A είναι ένα σημείο στο έδαφος, C_1, C_2 οι δύο αισθητήρες Cartosat-1, b η βάση του στερεοζεύγους, $(\alpha_1 + \alpha_2)$ είναι η παραλλακτική γωνία. Το τρίγωνο AC_1C_2 είναι ισοσκελές, γιατί οι αποστάσεις AC_1, AC_2 είναι πολύ μεγάλες και λαμβάνονται ίσες. Η παραλλακτική γωνία ισούται με το άθροισμα των απόλυτων τιμών των γωνιών κλίσης του αισθητήρα $(\alpha_1 + \alpha_2) = 31^\circ$. Η πλευρά AB_1 είναι διχοτόμος της παραλλακτικής γωνίας και διάμεσος της πλευράς C_1C_2 . Τα τρίγωνα AB_1C_1, AB_1C_2 είναι ορθογώνια.

Παρατηρείται ότι η ακρίβεια του παραχθέντος DSM (RMSE 1,4m) ήταν στα πλαίσια της αναμενόμενης ακρίβειας.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένα στερεοζεύγος εικόνων Cartosat-1, που καλύπτει την περιοχή του Χολομώντα Χαλκιδικής, για την παραγωγή ενός DSM με βήμα καννάβου 10m έκτασης στο έδαφος 770 km² περίπου. Η μέγιστη υψομετρική διαφορά της περιοχής μελέτης φτάνει τα 1150 m. Η ποιότητά του DSM αξιολογήθηκε με τη θεματική εικόνα “DSM Point Status Image”, που παράγεται ταυτόχρονα με το DSM, καθώς και με σύγκρισή του με τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου, μετρημένα με GPS, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον αεροτριγωνισμό. Από την εικόνα “DSM Point Status Image” προέκυψε ότι η ποιότητα του DSM ήταν πολύ καλή. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του DSM ήταν 1,4m, δηλαδή περίπου μισό pixel της εικόνας Cartosat-1. Η ακρίβεια αυτή βρίσκεται στα πλαίσια της αναμενόμενης ακρίβειας του DSM. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι οι στερεοεικόνες Cartosat-1 έχουν τη δυνατότητα παραγωγής DSM με ακρίβεια RMSE μικρότερη του ενός pixel, δεδομένου ότι κατά τον αεροτριγωνισμό θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των “Rational Functions” και φωτοσταθερά ακρίβειας μερικών εκατοστών με καλή κατανομή.

Βιβλιογραφία

- Baltsavias, E., Kocaman, S., Akca, D., Wolff, K., 2007. *Geometric And Radiometric Investigations Of Cartosat-1 Data*-ISPRS Workshop “High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information”, Hannover, Germany, May 29- June 1.
- Crespi, M., De Vendictis, L., Grün, A., Iannucci, G., Poli, D., Volpe, F., Wang, X., 2007. *Dsm Extraction From Quickbird And Cartosat Stereopairs: Quality Assessment And Comparison*-8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, Switzerland, 9-12 July, Proceeding of the Conference, Volume 1, pp.195-203.
- Kocaman, S., Wolff, K., Gruen, A., Baltsavias, E., 2008. *Geometric Validation Of Cartosat-1 Imagery*-XXI ISPRS Congress: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, pp. 1363-1368.
- Krishnaswamy, M., 2002. *Sensors and Platforms for High Resolution Imaging for Large Scale Mapping Applications -Indian Scenario*. Indian Cartographer, DAPI-01.
- Πατιάς, Π., 2001, *Σημειώσεις Διαχείρισης Φωτογραμμετρικής Παραγωγής*. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Singh, S.K., Naidu, S.D., Srinivasan, T.P., Krishna, B. G. and Srivastava, P.K., 2008. *Rational Polynomial Modelling for Cartosat-1 data*-XXI ISPRS Congress: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci-

ences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, pp. 885-888.

Titarov, P.S., 2008. *Evaluation Of Cartosat 1 Geometric Potential- XXI ISPRS Congress: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing, pp. 841-846.

Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, 2008, *Leica Photogrammetry Suite (LPS) Automatic Terrain Extraction (ATE) User's Guide*. USA, 82, 110-112 pp.

URLS

URL1-<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/cartosat-1.html>, 10-2011

URL2-http://www.euromap.de/docs/doc_004.html, 10-2011

URL3-<http://www.agro-tour.net>, 10-2011

URL4-<http://wikimapia.org>, 10-2011